

**Казаков Владимир Петрович**

**РАЗРАБОТКА И СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕМЕЙСТВА АДАПТИВНЫХ  
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ДВУХ- И ТРЕХМАССОВЫМИ УПРУГИМИ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ**

Специальность: 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ) кафедра систем автоматического управления

Научный руководитель:

доктор технических наук,  
профессор  
Путов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук,  
профессор Новиков Владислав Александрович,  
профессор кафедры робототехники и  
автоматизации производственных систем СПбГЭТУ

доктор технических наук,  
профессор Еремин Евгений Леонидович,  
проректор по научной работе и информатизации  
Тихоокеанского государственного университета

Ведущая организация – Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова

Защита диссертации состоится «\_\_\_» декабря 2011 года в \_\_\_\_\_ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.238.05 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

Ученый секретарь  
совета по защите докторских и  
кандидатских диссертаций Д 212.238.05

М. П. Белов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Проектирование аналитических с параметрической и сигнальной настройками и нейросетевых адаптивных систем управления электромеханическими объектами с упругими деформациями связано с решением задач снижения влияния различных факторов на качество управления: отсутствие априорной информации о значениях массоинерционных и упругих параметров; случайные изменения нагрузки; взаимовлияние степеней подвижности объектов; варьирование их параметров.

Упругие деформации звеньев механических конструкций и передач являются одним из факторов, препятствующих повышению эффективности управления электромеханическими объектами и подлежащих подавлению средствами управления. Многостепенные упругие электромеханические объекты с собственными частотами, лежащими в полосе пропускания исполнительных приводов, определяемой их максимально возможным быстродействием, характеризуются тем, что упругие колебания возбуждаются в них при любой попытке реализовать предельное быстродействие, что приводит к снижению качественных показателей объектов, их повышенному износу, поломкам и авариям, тормозит рост их производительности.

Другой необходимой предпосылкой создания аналитических и нейросетевых адаптивных систем автоматического управления электромеханическими объектами с упругими деформациями является переход от аналоговой элементной базы электронных блоков систем управления к современной высокопроизводительной микроконтроллерной технике промышленного и бортового применения.

Внедрение на предприятиях цифрового оборудования создает предпосылки к разработке и использованию специализированных программ по расчету, моделированию и настройке адаптивных систем управления и аппаратных средств их реализации на базе промышленных контроллеров. Однако такие программы требуют от настройщиков оборудования знаний специализированного программного обеспечения (MatLab, LabView и др.), а аппаратные средства недостаточно эффективны в условиях, когда параметры системы точно не известны.

Проблемам создания аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления электромеханическими объектами посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Андриевского Б. Р., Борцова Ю.А., Ефимова Д.В., Комашинского В. И., Круглова В. В., Лохина В.М., Мирошника И. В., Поляхова Н.Д., Путова В.В., Терехова В.А., Тюкина И.Ю., Фрадкова А.Л., Narendra K.S., Ortega R., Sarangapani J. и других.

Таким образом, задачи, связанные с разработкой и настройкой аналитических и нейросетевых адаптивных систем автоматического управления электромеханическими объектами с упругими деформациями, неполными измерениями, быстро и в широких пределах изменяющимися параметрами, а так же разработка комплекса программ расчета, моделирования и настройки адаптивных систем управления такими объектами являются актуальными.

**Цель диссертационной работы** – разработка и сравнительное исследование аналитических с параметрической и сигнальной настройками и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами, а также разработка комплекса программ для их расчета, моделирования и настройки.

**В диссертационной работе ставятся и решаются следующие задачи:**

1. Построить и исследовать аналитические адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройками для управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.
2. Построить и исследовать нейросетевые адаптивные системы управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.

3. Провести сравнительное исследование разработанного семейства аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.
4. Разработать комплекс программ расчета, моделирования и настройки семейства аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми электромеханическими объектами с упругими деформациями.

**Методы исследования** основаны на использовании теории управления, теории матриц, теории адаптивного управления, теории нейронных сетей. Проверка эффективности полученных теоретических результатов производилась в среде моделирования Matlab-Simulink.

**Научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Аналитические адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройками для управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами и результаты их исследования.
2. Нейросетевые адаптивные системы управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами и результаты их исследования.
3. Результаты сравнительного исследования семейства аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.
4. Комплекс программ моделирования и настройки семейства аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. Разработаны и проанализированы аналитические адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройками для управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами и определены области их применения.
2. Построены и исследованы нейросетевые адаптивные системы управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами, в качестве обучающей выборки для которых использовались входные и выходные сигналы аналитических адаптивных систем управления.
3. Получены новые результаты сравнительного исследования аналитических и обученных по аналитическим алгоритмам нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.
4. Построенное и изученное семейство аналитических и нейросетевых адаптивных систем используется в качестве библиотеки для разработки комплекса программ их инженерного расчета, моделирования и настройки.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается применением современных программных средств моделирования (Matlab-Simulink) и среды разработки приложений (Matlab Guide), а также подтверждается результатами компьютерного моделирования построенных в работе аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.

**Значимость полученных результатов для теории и практики:**

- **Теоретическая значимость диссертационной работы** состоит в том, что обобщены известные аналитические методы и выдвинут новый подход к обучению нейросетевых структур для построения семейства аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами, проведен сравнительный анализ их достоинств и недостатков и определены области их целесообразного использования.
- **Практическая полезность результатов диссертационной работы** состоит в том, что

полученные теоретические результаты по разработке и исследованию семейства аналитических и интеллектуальных адаптивных систем применены в разработке комплекса программ расчета, моделирования и настройки адаптивных систем для конкретных инженерных приложений в различных областях техники.

Построенный в диссертации комплекс программ расчета, моделирования и настройки открывает перспективы разработки нового поколения аналитических и нейросетевых систем управления реальными упругими электромеханическими объектами и их промышленной и бортовой микроконтроллерной реализации.

**Реализация результатов работы.** Результаты диссертационной работы использованы в 4 НИОКР:

- «Теоретические основы технологий безопасности движения подвижных объектов» (2006 – 2007 г.г.). Шифр – ФИЕТ/САУ-77. Источник финансирования – федеральный бюджет;

- «Создание автоматизированных методов синтеза и тестирования интеллектуальных мехатронных модулей» (2006 – 2008 г.г.). № гос. регистрации – 1.11.06 САУ-76. Источник финансирования – федеральный бюджет;

- «Разработка новой технологии измерения коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий, основанной на электромеханическом способе торможения измерительного колеса» государственный контракт от 15 июня 2009 г. № 02.740.11.0010 (2009-2011);

- «Создание автоматически управляемых электромеханических систем торможения колес воздушных и наземных транспортных средств» государственный контракт № П 548 от 05 августа 2009 г.(2009-2011).

Результаты диссертационной работы использованы также в двух дисциплинах профессионального цикла подготовки магистров по направлению «Управление в технических системах».

**Апробация работы.** Основные теоретические и прикладные результаты диссертационной работы докладывались и получили одобрение на 9 международных и всероссийских научно-технических конференциях: на XIV, XV, XVI всероссийских научно-технических конференциях «Экстремальная робототехника» (2003, 2004, 2005 годы, ЦНИИ РТК г. Санкт-Петербург); на IX, XI, XII конференциях молодых ученых «Навигация и управление движением» (2007, 2010, 2011 годы, «Электроприбор» г. Санкт-Петербург); на Третьей международной научно-практической конференции «Дни науки - 2007» (2007 год, г. Днепропетровск); на международной научно-технической конференции «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники» (2007г. Дивноморское); на XIV международной конференции по интегрированным навигационным системам (2007); на внутривузовских научно-технических конференциях в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 2003-2011гг., а также на научных семинарах кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 27 статьях и докладах, среди которых 5 статей включены в перечень изданий, рекомендованных ВАК, 7 статей в других изданиях, 4 свидетельства на программы ЭВМ, 11 работ в материалах международных и всероссийских научно-технических конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав с выводами и заключения. Основной материал диссертации изложен на 148 страницах машинописного текста, включает 133 рисунка, 9 таблиц и содержит список литературы из 88 наименований, среди которых 62 отечественных и 26 иностранных авторов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи диссертации, изложены основные научные результаты, выносимые на защиту, их научная новизна, достоверность и значимость теории и практики, отражены сведения о реализации и апробации работы.

**В первой главе** рассматривается описание в «скоростной» форме  $n$ -массового неразветвленного упругого электромеханического объекта с зазорами в упругих связях, строится наблюдатель состояния, модальное управление и эталонная модель, приводится методика построения адаптивных систем с сигнальной и параметрической настройками.

Система дифференциальных уравнений  $n$ -массового упругого электромеханического объекта с зазорами в упругих связях имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_я &= -\frac{R_я}{L_я} I_я - \frac{k_e}{L_я} \omega_1 + bu(t); \\ \dot{\omega}_1 &= \frac{1}{m_1} [k_m I_я - f_{y,1}]; \\ \dot{\omega}_i &= \frac{1}{m_i} [f_{y,i-1} - f_{y,i}], \quad i = \overline{2, n}; \\ \dot{m}_{y_i} &= p_i (\omega_i - \omega_{i+1}), \quad i = \overline{1, n-1}; \\ f_{y_i} &= \begin{cases} m_{y_i} - p_i \delta_i, & \text{если } m_{y_i} \geq p_i \delta_i; \\ 0, & \text{если } |m_{y_i}| < p_i \delta_i; \\ m_{y_i} + p_i \delta_i, & \text{если } m_{y_i} \leq -p_i \delta_i; \end{cases} \\ m_{y_i} &= p_i (q_i - q_{i+1}), \quad i = \overline{1, n-1}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $I_я$  - ток якоря;  $\boldsymbol{\omega} = [\omega_1 \dots \omega_i \dots \omega_n]^T$  -  $n$ -мерный вектор скоростей обобщенных масс  $m_1, m_2, \dots, m_i, \dots, m_n$ ;  $\mathbf{m}_y = [m_{y1} \dots m_{yi} \dots m_{yn-1}]^T$  -  $n-1$ -мерный вектор восстанавливающих сил (моментов) упругих связей;  $p_i$  - коэффициент упругости  $i$ -ой упругой связи;  $u$  - управляющее воздействие, приложенное к якорной цепи двигателя с коэффициентом усиления  $b$ ;  $f_{y_i}$  - упругий момент при учете зазоров;  $R_я$  - сопротивление якорной цепи;  $L_я$  - индуктивность обмотки якоря;  $k_e, k_m$  - постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными данными электрической машины; общий порядок дифференциальных уравнений движения многомассового упругого объекта равен  $m = 2n - 1$ .

Полагаем, что параметры объекта (1) неопределенны и/или нестационарны, а все упругие связи содержат зазоры. Введем для нелинейного нестационарного упругого электромеханического объекта (1) некоторое линеаризованное описание с постоянными параметрами и запишем линеаризованные уравнения в векторно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_я \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \\ \dot{\mathbf{m}}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_я}{L_я} & -\frac{k_e}{L_я} & 0 \dots \\ \frac{k_m}{m_1} & 0 & \mathbf{M} \\ 0 & \boldsymbol{\Omega} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_я \\ \boldsymbol{\omega} \\ \mathbf{m}_y \end{bmatrix} + \mathbf{b}_0 u(t), \quad (2)$$

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0 \mathbf{x} + \mathbf{b}_0 u(t)$$

где  $\mathbf{x}$  - вектор переменных состояния объекта;  $\mathbf{A}_0$  - матрица объекта;  $\mathbf{b}_0$  - вектор входов объект;  $\mathbf{\Omega}$  -  $(n-1) \times n$ -мерная, а  $\mathbf{M}$  -  $n \times (n-1)$ -мерная матрицы динамики объекта имеют двухдиагональные структуры вида:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{m_1} & 0 & 0 & \dots & & & \\ \frac{1}{m_2} & -\frac{1}{m_2} & 0 & \dots & & & \\ 0 & \frac{1}{m_3} & -\frac{1}{m_3} & \dots & & & \\ & & & \dots & \frac{1}{m_{n-2}} & -\frac{1}{m_{n-2}} & 0 \\ & & & & \dots & 0 & \frac{1}{m_{n-2}} & -\frac{1}{m_{n-2}} \\ & & & & & \dots & 0 & 0 & \frac{1}{m_n} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{\Omega} = \begin{bmatrix} p_1 & -p_1 & 0 & \dots & & & \\ 0 & p_2 & -p_2 & 0 & \dots & & \\ 0 & 0 & p_3 & -p_3 & \dots & & \\ & & & & \dots & p_{n-1} & -p_{n-1} & 0 \\ & & & & & \dots & 0 & p_n & -p_n \end{bmatrix}.$$

Реализация адаптивных систем управления с параметрической и сигнальной настройками требует знания всех переменных состояния объекта (1), а так как переменные  $\omega$  и  $\mathbf{m}_y$  недоступны измерению с помощью датчиков, то для их определения необходимо использовать асимптотические оценки этих переменных, вырабатываемые идентификатором состояния (наблюдателем).

Для объекта (1) по линеаризованным уравнениям (2) в диссертации строятся идентификатор состояния (наблюдатель), модальное (линейное) управление, эталонная модель, аналитические адаптивные системы с параметрической или сигнальной настройками.

**Идентификатор состояния (наблюдатель)** упругого электромеханического объекта (1), строится по параметрам усредненного объекта (2) и измерению любой обобщенной скорости  $\omega_k$  объекта (1) и имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{I}}_Я \\ \dot{\hat{\omega}} \\ \dot{\hat{\mathbf{m}}}_y \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_Я}{L_Я} & -\frac{k_e}{L_Я} & 0 & \dots \\ \frac{k_m}{m_1} & 0 & \mathbf{M} & \\ 0 & \mathbf{\Omega} & 0 & \\ \vdots & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{I}_Я \\ \hat{\omega} \\ \hat{\mathbf{m}}_y \end{bmatrix} + \mathbf{b}_0 u(t) + \mathbf{lc}^T (\omega_k - \hat{\omega}_k), \quad (3)$$

где  $(\hat{I}_Я; \hat{\omega}^T; \hat{\mathbf{m}}_y^T)^T$  - вектор оценок переменных состояния упругого электромеханического объекта;  $\mathbf{l} = (l_1, l_2, \dots, l_m)^T$  - вектор коэффициентов усилений обратных связей наблюдателя (3) по ошибке наблюдения  $\omega_k - \hat{\omega}_k$  измеренной переменной  $\omega_k$ ;  $\mathbf{c}^T$  - матрица-строка уравнения измерения,  $\mathbf{c}^T = (0, 0, \dots, k_e, 0, \dots, 0)$ ;  $k_e$  - коэффициент передачи датчика скорости  $\omega_k$ .

**Модальное (линейное) управление** упругим электромеханическим объектом (1) с учетом восстановленного наблюдателем (3) вектора переменных состояния, имеет вид:

$$u_{\text{л}}(t) = \mathbf{k}^T (\hat{I}_{\text{я}}, \hat{\omega}^T, \hat{\mathbf{m}}_y^T)^T = k_1 \hat{I}_{\text{я}} + k_2 \hat{\omega}_1 + \dots + k_k \omega_k + k_n \hat{\omega}_n + k_{n+1} \hat{m}_{y1} + \dots + k_{2n-1} \hat{m}_{y_{n-1}} = k_1 \hat{I}_{\text{я}} + \mathbf{k}_2^T \hat{\omega} + \mathbf{k}_3^T \hat{\mathbf{m}}_y, \quad (4)$$

где все линейные обратные связи формируются из оценок, вырабатываемых наблюдателем (3);  $\mathbf{k}^T = (k_1, k_2, \dots, k_m) = (k_1, \mathbf{k}_2^T, \mathbf{k}_3^T)$  – вектор-строка коэффициентов усиления линейного (модального) управления.

**Эталонная модель** для построения адаптивных систем управления с параметрической и сигнальной настройками выбирается в виде линеаризованной модели объекта (2) с построенным модальным управлением:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_{\text{м}} &= \mathbf{A}_{\text{м}} \mathbf{x}_{\text{м}} + \mathbf{b}_{\text{м}} u_0(t) \\ \mathbf{A}_{\text{м}} &= \mathbf{A}_0 + \mathbf{b}_0 \mathbf{k} \\ \mathbf{b}_{\text{м}} &= \mathbf{b}_0 \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{x}_{\text{м}}$  – вектор переменных состояния эталонной модели;  $\mathbf{A}_{\text{м}}$  – матрица эталонной модели;  $\mathbf{b}_{\text{м}}$  – вектор входов эталонной модели.

**Адаптивные системы управления с параметрической настройкой** строятся для объекта (1) с учетом наблюдателя (3), модального управления (4), эталонной модели (5) и законом управления вида:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma} &= u_0 + u_{\text{л}} + u_{\text{а}} \\ u_{\text{а}}(t) &= \mathbf{k}_{\text{А}}(t) \hat{\mathbf{x}} + k_{\text{В}}(t) u_0(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где дифференциальные уравнения алгоритмов настройки принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_{\text{А}}(t) &= -\gamma_{\text{А}} \mathbf{b}_{\text{М}}^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{x}}^T - \lambda_{\text{А}} \mathbf{k}_{\text{А}}(t); \\ \dot{k}_{\text{В}}(t) &= -\gamma_{\text{В}} \mathbf{b}_{\text{М}}^T \mathbf{P} \hat{e} u_0 - \lambda_{\text{В}} k_{\text{В}}(t), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

**Адаптивные системы управления с сигнальной настройкой** строятся для объекта (2) с учетом наблюдателя (3), модального управления (4), эталонной модели (5) и законом управления вида:

$$\begin{aligned} u_{\Sigma} &= u_0 + u_{\text{л}} + u_{\text{а}} \\ u_{\text{а}}(t) &= -h_0 \text{sign}[\mathbf{b}_{\text{М}}^T \mathbf{P} \hat{e}(t)]. \end{aligned} \quad (8)$$

**Во второй главе** производится расчет и исследование шестнадцати аналитических адаптивных систем управления с параметрической или сигнальной настройками для управления скоростью или положением двух- или трехмассовых упругих механических или электромеханических (с учетом электромагнитной инерции) объектов. В диссертации приведены расчеты и исследование всех шестнадцати систем управления, а в автореферате рассматриваются наиболее сложные примеры расчета аналитических адаптивных систем с параметрической или сигнальной настройками для управления положением трехмассового упругого электромеханического объекта.

Линеаризованные уравнения трехмассового упругого электромеханического объекта с трехконтурным подчиненным управлением по положению первой массы имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{q}_1 &= \omega_3; \quad \dot{\omega}_3 = J_3^{-1}(f_{y2} - M_{\text{сх}}); \quad \dot{m}_{y2} = p_2(\omega_2 - \omega_3); \\ \dot{\omega}_2 &= J_2^{-1}(f_{y1} - f_{y2}); \quad \dot{m}_{y1} = p_1(\omega_1 - \omega_2); \quad \dot{\omega}_1 = -J_1^{-1}f_{y1} + J_1^{-1}M_m; \\ L_{\text{я}} \dot{I}_{\text{я}} &= u_{\text{я}} - e_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}; \quad e_{\text{я}} = k_e \omega_1; \quad u_{\text{я}} = k_y u_y; \quad M_m = k_m I_{\text{я}}; \\ u_y &= u_{\text{т}} = \beta_{\text{т}}(u_{\text{с}} - k_{\text{т}} I_{\text{я}}); \quad u_{\text{с}} = \beta_{\text{с}}(u_{\text{п}} - k_{\text{с}} \omega_1); \quad u_{\text{п}} = \beta_{\text{п}}(q_{\text{зад}} - k_{\text{п}} q_1); \\ u_{\Sigma} &= u_0 + u_{\text{а}}; \quad u_0 = q_{\text{зад}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$



$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u_{\Sigma}; \quad \mathbf{y} = \mathbf{c}^T\mathbf{x}; \quad (10)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & a_6 \\ a_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 & a_9 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad \mathbf{c} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ c \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} q_1 \\ \omega_3 \\ m_{y2} \\ \omega_2 \\ m_{y1} \\ \omega_1 \\ I_{я} \end{bmatrix},$$

где  $J_1, J_2, J_3$  - моменты инерции первой, второй и третьей массы соответственно;  $p_1, p_2$  - коэффициенты упругости между первой и второй, второй и третьей массами соответственно;  $q_1$  - положение (угол поворота) первой массы;  $M_m$  - вращающий момент двигателя;  $R_{я}$  - активное сопротивление якорной цепи;  $I_{я}$  - ток в якорной цепи;  $L_{я}$  - индуктивность обмотки якоря;  $k_e, k_m$  - постоянные коэффициенты, определяемые конструктивными данными электрической машины;  $k_y$  - коэффициент передачи усилителя мощности;  $k_T, k_c, k_{\Pi}$  - коэффициенты передачи датчиков обратных связей по току, скорости и положению соответственно;  $\beta_T, \beta_c, \beta_{\Pi}$  - коэффициенты усиления регуляторов тока, скорости и положения соответственно;  $u_{\Sigma}$  - суммарный управляющий сигнал;  $u_0 = q_{зад}$  - задающее воздействие;  $u_a$  - адаптивное управление, подлежащее определению.

Далее рассчитываются коэффициенты вектора  $\mathbf{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4 \ l_5]^T$  усиления обратных связей наблюдателя по ошибке наблюдения, и строится идентификатор состояния (наблюдатель), записываемый в виде (3):

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{q}}_1 \\ \dot{\hat{\omega}}_3 \\ \dot{\hat{m}}_{y2} \\ \dot{\hat{\omega}}_2 \\ \dot{\hat{m}}_{y1} \\ \dot{\hat{\omega}}_1 \\ \dot{\hat{I}}_{я} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & a_6 \\ a_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{q}_1 \\ \hat{\omega}_3 \\ \hat{m}_{y2} \\ \hat{\omega}_2 \\ \hat{m}_{y1} \\ \hat{\omega}_1 \\ \hat{I}_{я} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u_{\Sigma} + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ l_4 \\ l_5 \\ l_6 \\ l_7 \end{bmatrix} [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ c \ 0] (\omega_1 - \hat{\omega}_1) \quad (11)$$

Затем рассчитываются коэффициенты вектора  $\mathbf{k} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4 \ k_5 \ k_6 \ k_7]$  усиления линейного (модального) управления и строится модальное (линейное) управление в виде (4):

$$u_{л}(t) = k_1 \hat{q}_1 + k_2 \hat{\omega}_3 + k_3 \hat{m}_{y2} + k_4 \hat{\omega}_2 + k_5 \hat{m}_{y1} + k_6 \hat{\omega}_1 + k_7 \hat{I}_{я} \quad (12)$$

По уравнениям (5) строится эталонная модель вида:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{M1} \\ \dot{\omega}_{M3} \\ \dot{m}_{My2} \\ \dot{\omega}_{M2} \\ \dot{m}_{My1} \\ \dot{\omega}_{M1} \\ \dot{I}_{Mя} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_2 & 0 & a_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -a_3 & 0 & a_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -a_4 & 0 & a_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_5 & 0 & a_6 \\ a_7 + bk_1 & bk_2 & bk_3 & bk_4 & bk_5 & a_8 + bk_6 & a_9 + bk_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{M1} \\ \omega_{M3} \\ m_{My2} \\ \omega_{M2} \\ m_{My1} \\ \omega_{M1} \\ I_{Mя} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix} u_{\Sigma} \quad (13)$$

Адаптивная система с параметрической настройкой из (6), (7) для трехмассового упругого объекта имеет вид:

$$u_a(t) = \mathbf{k}_A(t) \hat{\mathbf{x}} + k_B(t) u_0(t) \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_A(t) &= -\gamma_A \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{x}}^T - \lambda_A \mathbf{k}_A(t); \\ \dot{\mathbf{k}}_B(t) &= -\gamma_B \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{u}}_0^T - \lambda_B \mathbf{k}_B(t), \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

или в скалярной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_{A1}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{q} - \lambda_A k_{A1}(t); & \dot{k}_{A2}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{\omega}_3 - \lambda_A k_{A2}(t); \\ \dot{k}_{A3}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{m}_{y2} - \lambda_A k_{A3}(t); & \dot{k}_{A4}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{\omega}_2 - \lambda_A k_{A4}(t); \\ \dot{k}_{A5}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{m}_{y1} - \lambda_A k_{A5}(t); & \dot{k}_{A6}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{\omega}_1 - \lambda_A k_{A6}(t); \\ \dot{k}_{A7}(t) &= -\gamma_A \delta(\hat{e}) \hat{\omega}_1 - \lambda_A k_{A7}(t); & \dot{k}_B(t) &= -\gamma_B \delta(\hat{e}) u_0 - \lambda_B k_B(t), \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где  $\delta(\hat{e}) = \mathbf{b}_M^T \mathbf{P} \hat{\mathbf{e}}$ .

Адаптивная система с сигнальной настройкой (8) имеет вид:

$$u_a(t) = -h_0 \text{sign}[\delta(\hat{e})] \quad (17)$$

Остальные четырнадцать примеров расчета аналитических адаптивных систем для двух- или трехмассовых объектов (системы управления скоростью или положением механических или электромеханических объектов) строятся аналогичным способом.

Результаты моделирования всех систем управления приведены во второй главе виде графиков переходных процессов и таблиц с показателями качества переходных процессов.

**В третьей главе** строятся нейросетевые адаптивные системы управления двух- и трехмассовыми упругими механическими (без учета электромагнитной инерции) объектами, в качестве обучающей выборки для которых использовались входные и выходные сигналы аналитических адаптивных систем управления с сигнальной или параметрической настройками. Проводятся исследования и сравнительный анализ аналитических и нейросетевых адаптивных систем для управления двух- и трехмассовыми упругими механическими объектами.

Для управления динамическими объектами с постоянными параметрами, как правило, используются нейронные сети прямого распространения. Если параметры объекта изменяются, то необходимо изменять веса нейронной сети (переобучать сеть заново) или использовать нейронные сети с настраиваемым базисом. Использование многослойных нейронных сетей прямого распространения с настраиваемым базисом усложняется подходящим выбором архитектуры сети – количества элементов и настраиваемого базиса<sup>1</sup>.

В диссертации создается новая обучающая выборка для многослойной нейронной сети прямого распространения, где в качестве «учителя» выступают аналитические адаптивные системы управления с параметрической или сигнальной настройками для управления двух- или трехмассовыми упругими механическими объектами. Применение этой обучающей выборки создает нейронную сеть, способную работать в условиях изменения параметров объекта, а замена аналитических на нейросетевые адаптивные системы управления упрощает микроконтроллерную реализацию.

Выбирается многослойная нейронная сеть прямого распространения с функциями активации в скрытых слоях вида сигмоидально-гиперболического тангенса (*tansig*) и с линейной функцией активации в выходном слое. Количество нейронов во входном слое соответствует количеству входных переменных, в выходном слое используется один нейрон. Выбор количества скрытых слоев и нейронов в них зависит от сложности объекта управления и подбирается опытным путем в процессе обучения. В диссертации для двухмассовых механических объектов используются нейронные сети с входным, одним скрытым и выходным слоями; для трехмассовых механических объектов количество скрытых слоев увеличено на

<sup>1</sup> Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах/ Синергетика: от прошлого к будущему. – М.: ЛКИ, 2008 – 384 с.

один.

В качестве алгоритма обучения нейронной сети выбирают алгоритм обратного распространения ошибки.

**Обучение нейросетевой адаптивной системы управления двухмассовым упругим механическим объектом с эталонной моделью.**

В соответствии с числом входных и выходных переменных выберем число нейронов во входном слое равным 9, в выходном равным 1. Число нейронов в скрытом слое было выбрано равным 9. В обучении нейронной сети был применен алгоритм обратного распространения ошибки. Структура нейронной сети прямого распространения представлена на рисунках 2, 3.

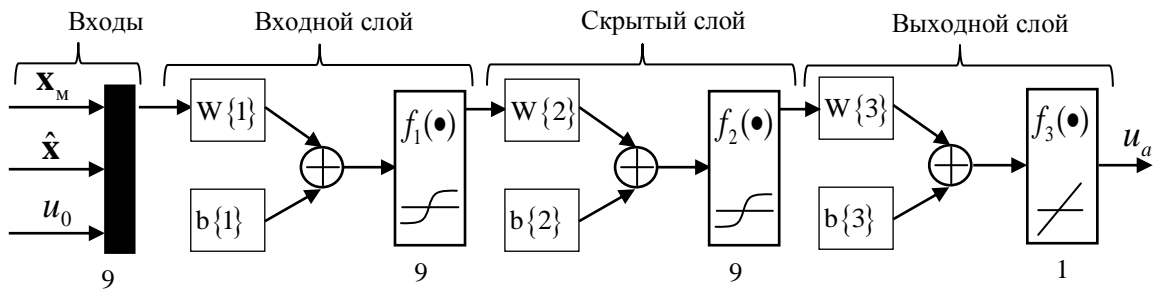


Рисунок 2 - Схема нейросетевой системы управления, обученной по адаптивной системе с параметрической настройкой для управления двухмассовым упругим механическим объектом (без учета электромагнитной инерции якорной цепи)

$$\begin{aligned}
 u_a &= f_3(W\{3\}f_2(\bullet)+b\{3\})\Big|_1^1 = f_3(W\{3\}f_2(W\{2\}f_1(\bullet)+b\{2\})+b\{3\})\Big|_1^1 = \\
 &= f_3(W\{3\}f_2(W\{2\}f_1(W\{1\}[\mathbf{x} \ e \ u_0]^T + b\{1\})+b\{2\})+b\{3\})\Big|_1^1,
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

где  $W\{1\}$ ,  $W\{2\}$ ,  $W\{3\}$ – весовые матрицы первого, второго и третьего слоев соответственно;  $b\{1\}$ ,  $b\{2\}$ ,  $b\{3\}$ – пороги (смещение) первого, второго и третьего слоев соответственно;  $f_3(\cdot)$  – линейная функция;  $f_1(\cdot)$ ,  $f_2(\cdot)$ – сигмоидально-гиперболический тангенс.

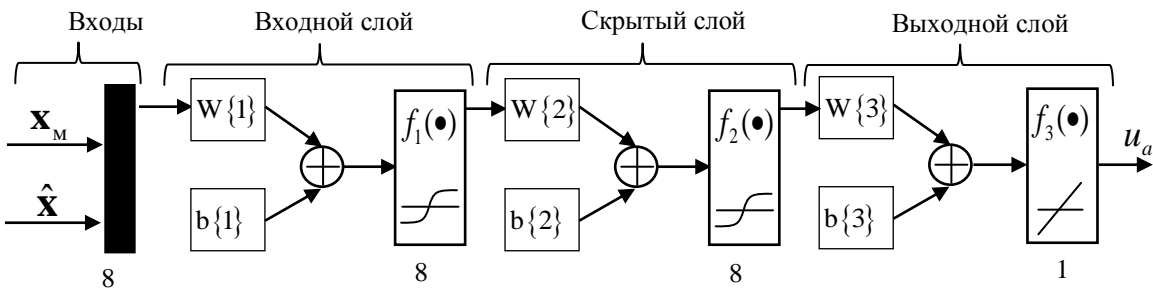


Рисунок 3 - Схема нейросетевой системы управления, обученной по адаптивной системе с сигнальной настройкой для управления двухмассовым упругим механическим объектом (без учета электромагнитной инерции якорной цепи)

**Обучение нейросетевой адаптивной системы управления трехмассовым упругим механическим объектом с эталонной моделью.**

Структура нейронной сети прямого распространения представлена на рисунках 4, 5.

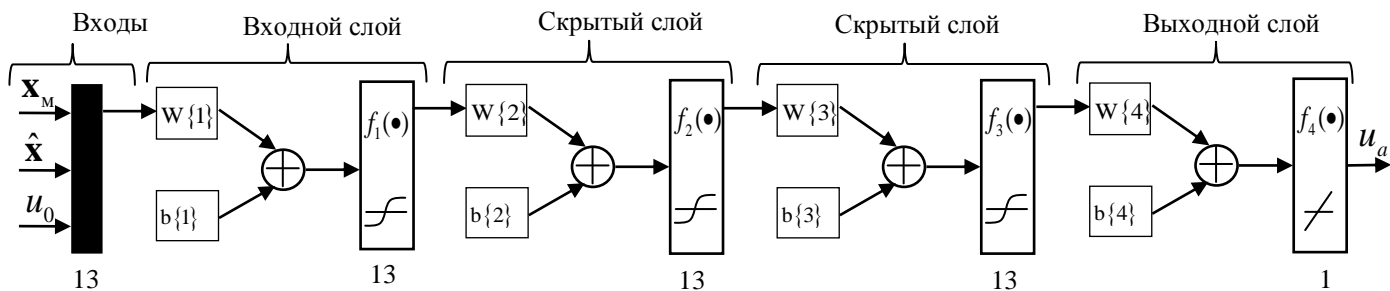


Рисунок 4 - Схема нейросетевой системы управления, обученной по адаптивной системе с параметрической настройкой для управления трехмассовым упругим механическим объектом (без учета электромагнитной инерции якорной цепи)

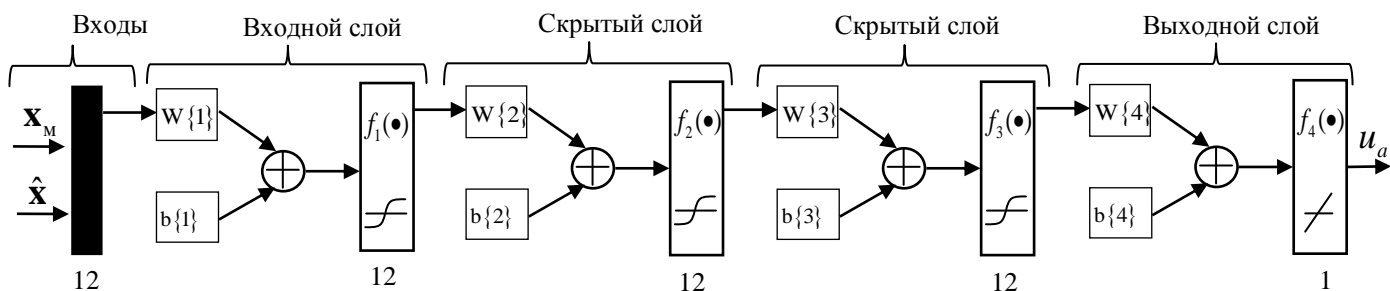


Рисунок 5 - Схема нейросетевой системы управления, обученной по адаптивной системе с сигнальной настройкой для управления трехмассовым упругим механическим объектом (без учета электромагнитной инерции якорной цепи)

Из результатов исследования видно, что работоспособность нейронных сетей в решении задач управления двух- и трехмассовыми механическими объектами с упругими деформациями приближается к работоспособности адаптивных систем с параметрической или сигнальной настройками. Нейронные сети являются более простыми, чем адаптивные системы и требуют при их микроконтроллерной реализации гораздо меньших вычислительных ресурсов, чем аналитические системы управления, а этап их отладки заканчивается обучением.

**В четвертой главе** разрабатывается комплекс программ расчета, моделирования и настройки шестнадцати систем автоматического управления двух- и трехмассовых упругих механических и электромеханических объектов, описанных во второй главе.

Программа разрабатывается в специальной среде GUI-приложений пакета Matlab и предназначена для исследования двух- и трехмассовых упругих механических и электромеханических объектов при изменении их параметров: масс, коэффициентов упругости между массами, электромагнитной постоянной. Программа содержит в себе библиотеку механических и электромеханических объектов с различными видами регуляторов: подчиненное и модальное управление, аналитические и нейросетевые адаптивные системы, а так же файлы помощи пользователю, описывающие системы управления и способы их настройки.

Ниже приводится пример расчета, моделирования и отладки адаптивной системы управления с параметрической настройкой для трехмассового упругого электромеханического объекта (9) - (16), рассчитанного во второй главе. Пункты меню и приложения содержат в себе информацию по работе с трехмассовым упругим электромеханическим объектом.

Запуск программы осуществляется командой «startupobj», набранной в основном окне Matlab, после которой появляется окно «ВЫБОР СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ», предлагающее выбрать одно из двух направлений исследования: 1) система управления положением; 2) система управления скоростью (см. рисунок 6).

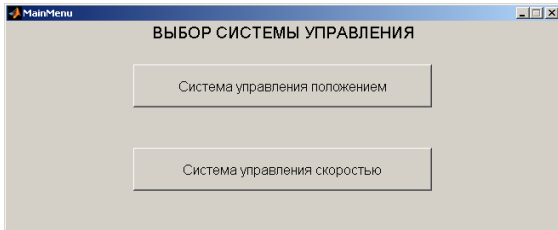


Рисунок 6 - «ВЫБОР СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ»

Так как наш объект относится к системам управления положением, то выбирается пункт меню «СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЕМ». Появляется окно «МЕНЮ ВЫБОРА РЕГУЛЯТОРОВ» (см. рисунок 7), где оператор делает выбор регулятора и объекта управления (в нашем случае это «АДАПТИВНЫЙ РЕГУЛЯТОР ТРЕХМАССОВОГО ОБЪЕКТА»).

Открывается основное окно, содержащее строку меню, краткое описание достоинств и недостатков адаптивной системы управления и область вывода графиков переходных процессов (см. рисунок 8).

Строка меню (см. рисунок 9) содержит следующие пункты:

1. «ФАЙЛ» - сохранение и открытие файлов Matlab;
2. «АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ» - меню выбора типа адаптивного регулятора;
3. «РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ» - используется для расчета неизвестных параметров объекта ( $J_{02}, J_{03}, p_{01}, p_{02}$ );
4. «ИСХОДНЫЕ ПАРАМЕТРЫ» - используется для ввода исходных параметров объекта ( $J_1, J_2, J_3, p_1, p_2, R_я, I_я, L_я, k_e, k_m, k_y, k_T, k_c, k_{п}$ ). Для предотвращения ошибок и

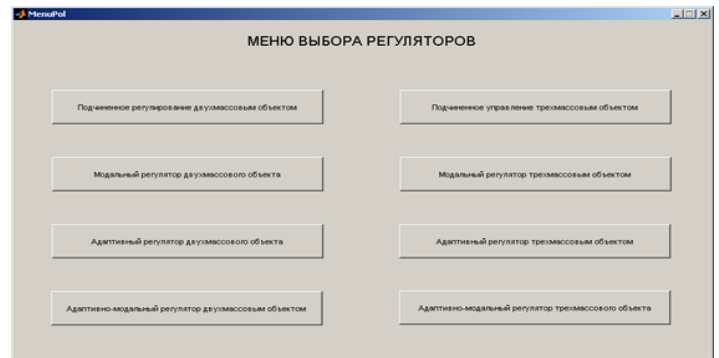


Рисунок 7 – «МЕНЮ ВЫБОРА РЕГУЛЯТОРОВ»

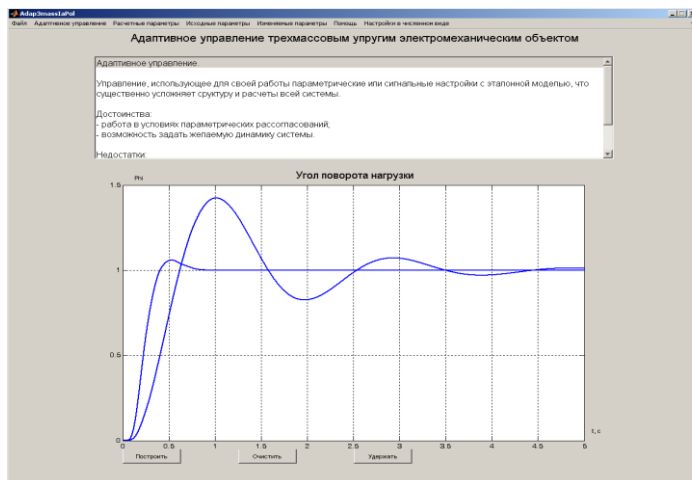


Рисунок 8 – Окно исследования систем управления трехмассового упругого электромеханического объекта с учетом электромагнитной постоянной

управления, систем управления и рекомендации по настройке параметров систем управления;

7. «НАСТРОЙКИ В ЧИСЛЕННОМ ВИДЕ» - выводит на экран уравнения наблюдателя, модального управления, эталонной модели, адаптивной системы с параметрической или сигнальной настройками в числовом виде.

сбоев в программе моделирования, исходные параметры двух- и трехмассовых упругих механических и электромеханических объектов имеют значения, установленные по умолчанию;

5. «ИЗМЕНЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ» - параметры объекта, которые пользователь может изменить в процессе моделирования ( $J_{01}, J_{02}, J_{03}, p_{01}, p_{02}, \gamma_A, \gamma_B, \lambda_A, \lambda_B, \beta_T, \beta_c, \beta_{п}$ );

6. «ПОМОЩЬ» - содержит подробное описание объекта



Рисунок 9 – Строка меню

Допустим, что нам известны все параметры объекта, тогда после ввода исходных параметров объекта начинается процесс моделирования: в строке меню выбираем «АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ» → «ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ НАСТРОЙКА» → «С УЧЕТОМ Ля» → «ХП ПО НЬУТОНУ». Затем под область вывода графиков нажимаем на кнопку «ПОСТРОИТЬ» и получаем график переходного процесса (см. рисунок 8).

Проверим, как аналитическая адаптивная система справляется с изменением параметров трехмассового упругого электромеханического объекта. Для этого, например, увеличим момент инерции третьей массы в пять раз и построим график переходного процесса на одних осях с графиком при номинальных параметрах (см. рисунок 8). Аналогично можно изменить любой другой параметр

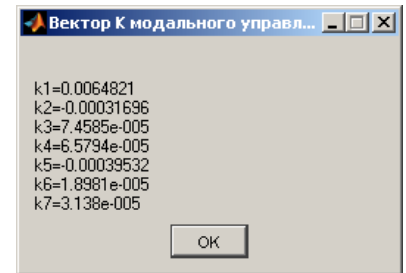


Рисунок 10 - Вектор-строка коэффициентов усиления линейного (модального) управления.

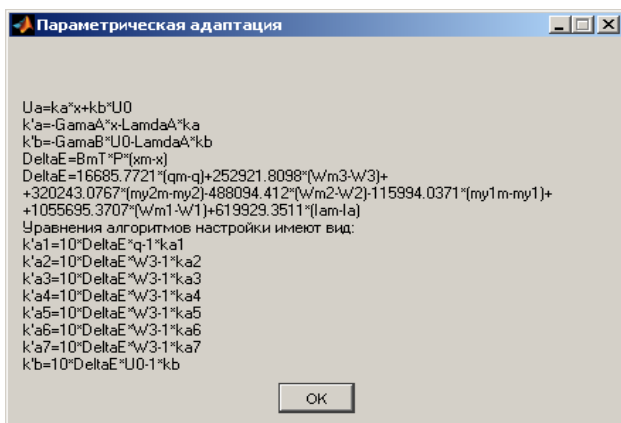


Рисунок 11 – Уравнения адаптивной системы с параметрической настройкой в числовом виде

объекта и (или) системы управления. Если полученные переходные процессы удовлетворяют нашему требованию, то оператор может получить уравнения наблюдателя, настройки модального управления (см. рисунок 10), уравнения эталонной модели, уравнения аналитической адаптивной системы с параметрической настройкой в числовом виде. На рисунке 11 приведен пример отображения уравнений адаптивной системы управления с параметрической настройкой для трехмассового упругого электромеханического объекта.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с целью и задачами диссертации проведены теоретические, вычислительные и экспериментальные работы. Основные результаты исследований, выполненных автором:

1. Построены и исследованы аналитические адаптивные системы с параметрической и сигнальной настройками для управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.
2. Построены и исследованы нейросетевые адаптивные системы управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами, в качестве обучающей выборки для которых используются входные и выходные сигналы аналитических адаптивных систем управления с сигнальной и параметрической настройками.
3. Проведено сравнительное исследование аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми упругими электромеханическими объектами.
4. Разработан комплекс программ расчета, моделирования и настройки аналитических и нейросетевых адаптивных систем управления двух- и трехмассовыми электромеханическими объектами с упругими деформациями.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. В.П. Казаков, В.В. Путов, А.В. Низовой, Ш.А. Дашаев, А.А. Иванов, А.В. Путов. Электромеханическая мобильная установка аэродромного обслуживания нового поколения для оперативного контроля взлетно-посадочной полосы [Текст]// Мехатроника, автоматизация и управление №5.- 2003. – С. 32-39.
2. В.П. Казаков, В.В. Путов, А.В. Низовой, Н.А. Тимчук, А.В. Путов. Электромеханическая мобильная установка нового поколения для автоматизированного контроля взлетно-посадочной [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».-№1.-2003.-С.3-7
3. В.П. Казаков, В.В. Путов, Ю.К. Козлов, А.В. Путов. Адаптивные электромеханические системы наведения и стабилизации специальных объектов и мобильных робототехнических комплексов [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».-№1.-2004, с. 3-8
4. В.П. Казаков, В.В. Лебедев, В.В. Путов, В.Н. Шелудько, Ч.А. Зунг. Семейство адаптивных систем управления многомассовым нелинейным упругим механическим объектом с неопределенными параметрами и неполными измерениями [Текст]// Известия государственного электротехнического университета. Серия «Автоматизация и управление».СПб:СПбГЭТУ «ЛЭТИ».-№1. - 2006 г. С. 3-8
5. Казаков В.Н, В. В. Путов, Шелудько В.Н, Лебедев В.В, Зунг Ч.А, Путов А.В, Друян Е.В. Семейство аналитических и интеллектуальных адаптивных систем управления нелинейными упругими электромеханическими объектами [Текст]//Мехатроника, автоматизация и управление № 10.-2007.- С. 16-25

### Патенты и свидетельства программ ЭВМ:

6. В.П. Казаков, В.Н. Шелудько, А.В. Путов, Е.В. Друян. Программа распознавания геометрических фигур на основе нейронной сети// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2011613278. 27.04.2011
7. В.П. Казаков, В.Н. Шелудько, В.В. Путов, Е.В. Друян. Программа контроллера электромеханического измерителя коэффициента сцепления аэродромных и автодорожных покрытий. // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2011613150. 21.04.2011
8. В.П. Казаков, В.В. Путов, В.Н. Шелудько, А.В. Путов, Е.В. Друян, Т.Л. Русяева, А.Н. Щербаков. Программа контроллера системы термостатирования тензометрического датчика усилия буксируемого измерителя коэффициента сцепления// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. № 2011615351. 08.06.2011
9. В.П. Казаков, В.Н. Шелудько, А.В. Путов, Е.В. Друян, А.Н. Щербаков. Программа термостатирования тензометрического датчика усилия динамометрического барабанного стенда для испытаний измерителей коэффициента сцепления// Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Заявка на регистрацию 10.05.2011

### В других изданиях:

10. В.П. Казаков, В.В. Путов, Н.А. Тимчук, А.В. Путов, Р.В. Ленц, А.В. Низовой, Ю.К. Козлов. Электромеханический энергосберегающий мобильный комплекс предпосадочного контроля состояния аэродромной полосы в экстремальных погодных условиях// Сб. докл. «Управление и информационные технологии». УИТ-2003.-СПб.: ИСПОСервис.-2003.-С.246-251

11. В.П. Казаков, А.В. Путов. Информационно-управляющая система мобильной системы контроля ВПП// Доклад на 14 конференции «Экстремальная робототехника» ЦНИИ РТК. СПб.: 2003. с. 226-230
12. В.П. Казаков, А.В. Путов. Микроконтроллерная система обработки информации и управления мобильной установкой контроля фрикционных свойств взлетно-посадочной полосы //15-ая научно-техническая конференция «Экстремальная робототехника». СПб.: 2004
13. В.П. Казаков. Расчет и сравнительный анализ прямого и идентификационного подходов сигнальной адаптации // Доклад на 16 конференции «Экстремальная робототехника» ЦНИИ РТК. СПб.: 2005.
14. В.П. Казаков, А.В. Путов. Микропроцессорная электромеханическая система подавления упругих колебаний, возникающих при управлении механическими объектами на подвижном основании // IX конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 13-15 марта 2007 г.СПб.:2007
15. В.П. Казаков, А.В. Путов. Сравнительный анализ аналитического и нейросетевого (обученного по аналитическому) алгоритмов управления двухмассовым упругим объектом// XIV межд. конф. по интегрированным навигационным системам. 28-30 мая 2007. СПб.: 2007
16. В.П. Казаков. Микропроцессорная электромеханическая система подавления упругих колебаний, возникающих при управлении механическими объектами на подвижном основании// межвузовская науч-техн конф студентов, аспирантов и молодых ученых «Системы управления и передачи информации». БГТУ «Военмех». 15 мая 2007 г. СПб.:2007. с. 46-47
17. В.П. Казаков, А.В. Путов. Построение нейросетевого, обученного по аналитическому, алгоритма управления двухмассовым упругими объектом // межд. науч.-техн. конф. «Проблемы информационно-компьютерных технологий и мехатроники». 24-29 сентября 2007г. . Дивноморское. 2007. Изд-во Таганрогского ИЮФУ. с. 220-225
18. В.П. Казаков, С.Е. Голик, А.В. Вейнмейстер, Е.В. Друян, А.В. Путов. Микропроцессорные устройства: Метод. указания к лабораторным работам. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2007. 88 с.
19. В. П. Казаков, Путов В.В, Шелудько В. Н., Путов А. В., Е.В. Друян, А. С. Пекаровский, Н. А. Русяев, Н. А. Щербаков. Инновационные проекты в проектировании современных средств оценки тормозящих свойств искусственных ВПП//VII межд. конф. «Материалы, оборудование и технологии, применяемые для содержания аэродромов гражданской авиации». 24-25 сентябрь 2009
20. В.П. Казаков, А.С. Пекаровский, Во Конг Фьонг, Нгуен Кьен Чьен. Разработка адаптивных аналитических и интеллектуальных систем управления упругим электромеханическим объектом // XI конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2010 г. СПб.:2010
21. В.П. Казаков, А.С. Пекаровский, Во Конг Фьонг, Нгуен Кьен Чьен. Разработка систем управления двухкоординатным роботом-манипулятором и механическим объектом в двухосном кардановом подвесе // XI конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2010 г. СПб.:2010
22. В. П. Казаков, Путов В.В, Шелудько В. Н., Путов А. В., В. П. Казаков, Е.В. Друян, А.С. Пекаровский, А.Н. Щербаков, Н. А. Русяев. Аэродромный измеритель коэффициента сцепления нового поколения ИКС-1: сервис, обучение, развитие // IX



- межд. конф. и выставка «Современные методики контроля и восстановления искусственных покрытий аэродромов и автомобильных дорог». 24-25 июня 2010.
23. В. П. Казаков, Путов В.В, Путов А. В, Е.В. Друян, А.С. Пекаровский, А.Н. Щербаков, Н. А. Русяев. Испытания буксируемых электромеханических измерителей коэффициента сцепления в лабораторных условиях// IX межд. конф. и выставка «Современные методики контроля и восстановления искусственных покрытий аэродромов и автомобильных дорог». 24-25 июня 2010
24. Информационно-управляющие комплексы аэродромного обслуживания: Методические указания к лабораторным работам/ Сост.: Казаков В. П., Путов В.В, Путов А. В, Друян Е.В., Русяева Т.Л. Электронный учебник. 2010. 115 с.
25. В.П. Казаков, Е.В. Друян, А.Н. Кокоулин. Адаптивные системы автоматического управления электромеханическими объектами на базе структур с эталонными и настраиваемыми моделями с параметрической и сигнальной настройками и динамическими наблюдателями// сб. науч. тр. «Поисковые научные исследования молодых ученых по техническим наукам в научно-образовательных центрах СПбГЭТУ». СПб.: Изд-во СПбГЭТУ. 2010. С. 84-90
26. В.П. Казаков, В.Н. Шелудько, А. С. Пекаровский, Н.А. Русяев, И.Е. Большаков. «Разработка адаптивных интеллектуальных систем управления промышленным роботом-манипулятором с применением искусственных нейронных сетей различной структуры»// XII конф. молодых ученых «Навигация и управление движением». 15-18 марта 2011 г. СПб.:2011
27. Казаков В.П., Во Конг Фыонг, Нгуен Кьем Чьен, Шелудько В.Н. Разработка прямых адаптивных систем с применением нейронных сетей для управления трехмассовым упругим электромеханическим объектом//Материалы конференции «Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям»//23-25 июня 2010 г., Санкт – Петербург. С. 64-67.